

PENGEMBANGAN METODE 'DRASTIC' UNTUK PREDIKSI KERENTANAN AIRTANAH BEBAS TERHADAP PENCEMARAN DI SLEMAN

M. Widyastuti

m.widyastuti@geo.ugm.ac.id

Jurusan Geografi Fisik Fakultas Geografi UGM, Yogyakarta, Telpn +62.274.649.2332

Sudarto Notosiswoyo

sudarto@mining.itb.ac.id

Komang Anggayana

komang@mining.itb.ac.id

Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral ITB, Bandung

INTISARI

Penelitian ini bertujuan: (1) mengetahui sebaran setiap parameter DRASTIC; (2) mengetahui sebaran penggunaan lahan; (3) mengetahui tingkat kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran; (4) evaluasi tingkat kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran. Metode yang digunakan adalah pembobotan dan penilaian parameter, meliputi parameter DRASTIC dan penggunaan lahan. Kerentanan airtanah bebas ditentukan dengan penjumlahan hasil perkalian bobot dan nilai semua parameter. Penjumlahan hasil kali parameter DRASTIC menghasilkan Indeks DRASTIC yang mencerminkan kerentanan statis, sedangkan penggabungan Indeks DRASTIC dan hasil kali parameter penggunaan lahan menghasilkan Indeks Kerentanan yang mencerminkan kerentanan dinamis. Keseluruhan airtanah bebas di daerah penelitian mempunyai kerentanan tinggi terhadap pencemar. Faktor yang mempengaruhi tingginya tingkat kerentanan adalah kedalaman muka airtanah bebas, materi yang porus, dan penggunaan lahan.

Kata kunci: Kerentanan, airtanah bebas, pencemaran, DRASTIC

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Airtanah merupakan salah satu air baku yang banyak dimanfaatkan oleh manusia guna menunjang kebutuhan baik untuk keperluan rumah tangga (domestik), industri, jasa maupun pertanian. Untuk memenuhi kebutuhan air tersebut dituntut jumlah yang cukup maupun kualitas yang memadai. Hal itu perlu ditekankan bahwa seringkali airtanah cukup dari segi kuantitas, namun dari sisi

kualitas tidak memenuhi syarat untuk pemenuhan kebutuhan. Menurut Hem (1970), banyak faktor yang berpengaruh terhadap kualitas air, baik alami maupun non alami (*antropogenic factor*). Faktor alami yang berpengaruh terhadap kualitas air adalah iklim, geologi, vegetasi dan waktu, sedangkan faktor non alami adalah manusia. Pertambahan penduduk membawa konsekuensi terhadap peningkatan kebutuhan akan airtanah. Selain itu pertambahan penduduk juga menuntut sarana dan prasarana untuk mendukung segala aktivitasnya. Permasalahannya adalah bahwa disadari ataupun tidak, aktivitas manusia tersebut dapat membawa dampak merugikan antara lain adalah penurunan kualitas air atau pencemaran, demikian halnya dengan airtanah.

Proses masuknya zat pencemar ke dalam airtanah dipengaruhi oleh karakteristik hidrogeologi atau dengan kata lain bahwa secara fisik karakteristik hidrogeologi suatu daerah dapat mempunyai tingkat perlindungan tertentu terhadap pencemaran airtanah (Todd, 1980; Vrba dan Zaporosec, 1994). Karakteristik hidrogeologi tersebut antara lain : kedalaman muka airtanah, curah hujan, topografi (lereng), litologi, tekstur tanah, dan konduktivitas hidraulik. Dengan demikian berdasarkan karakteristik hidrogeologi tersebut dapat diperkirakan sensitivitas atau kerentanan airtanah terhadap pencemaran.

Perlindungan terhadap airtanah dari pencemaran menjadi sangat penting pada saat ini dengan melihat pesatnya variasi bentuk dan perkembangan penggunaan lahan. Salah satu cara yang dapat ditempuh untuk melindungi airtanah dari pencemaran adalah melalui zonasi atau pemetaan kerentanan airtanah terhadap pencemaran. Dengan mengetahui tingkat kerentanan airtanah suatu daerah terhadap pencemaran, maka hal tersebut dapat menjadi bahan pertimbangan yang sangat penting, khususnya dalam suatu pengambilan keputusan mengenai penataan wilayah ataupun pengaturan kegiatan dalam rangka pengembangan wilayah yang bersangkutan.

Daerah penelitian mencakup tiga wilayah kecamatan di Kabupaten Sleman, yaitu Kecamatan Sleman, Ngaglik dan Ngemplak. Ada dua hal yang menarik dan menjadi pertimbangan yaitu 1) wilayah penelitian terletak pada zona resapan air dan 2) wilayah tersebut dewasa ini juga mengalami perkembangan yang pesat. Perkembangan wilayah tersebut antara lain banyaknya pembangunan perumahan yang disertai juga dengan munculnya fasilitas-fasilitas pendukung lainnya. Lajunya pertambahan jumlah penduduk dan fungsi peruntukan ruang yang diatur dalam rencana tata ruang wilayah yang bersangkutan, merupakan suatu alasan terjadinya perkembangan tersebut. Berubahnya lahan pertanian menjadi lahan permukiman/perumahan, tumbuhnya lokasi atau kawasan industri; membawa konsekuensi bagi tumbuhnya pusat-pusat pelayanan baru. Perubahan penggunaan lahan merupakan potensi bagi pencemaran airtanah bebas, karena penggunaan lahan merupakan salah satu sumber pencemaran airtanah dan mempunyai kontribusi bagi masuknya polutan ke dalam airtanah. Oleh karenanya, sebagai pengendali pengembangan wilayah, perlu dilakukan studi ini.

Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud penelitian ini adalah memperkirakan kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran melalui pengembangan metode DRASTIC. Adapun tujuan penelitian adalah: 1) mengetahui sebaran masing-masing parameter DRASTIC, yaitu: kedalaman muka airtanah, curah hujan, media akuifer, tekstur tanah, lereng, media zona tak jenuh, dan konduktivitas hidraulik; 2) mengetahui sebaran penggunaan lahan yang merupakan potensi sumber pencemaran airtanah; 3) mengetahui sebaran tingkat kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran; 4) mengevaluasi pada masing-masing tingkatan kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran.

Tinjauan Pustaka

Airtanah merupakan bagian dari siklus hidrologi, dan didefinisikan sebagai air yang berada di bawah permukaan tanah pada zona jenuh air dengan tekanan hidrostatik sama atau lebih besar dari daripada tekanan udara (Todd, 1980). Keterdapatannya dipengaruhi oleh perkembangan dan sifat-sifat geologi, kondisi batas formasi, iklim aktivitas manusia dan kondisi lingkungan (Kashef, 1986). Terminologi yang terkait dengan perlapisan geologi dan mempunyai peranan penting bagi keterdapatannya air tanah adalah akuifer (*aquifer*), akuiklude (*aquiclude*), dan akuitard (*aquitard*). Berbagai definisi mengenai hal tersebut dikemukakan oleh banyak ahli seperti Freeze dan Cherry (1979), Todd (1980), Kruseman dan de Ridder (1991), serta Fetter (1994). Airtanah tersimpan dan mengalir dalam suatu media yang permeabel yang disebut akuifer atau dengan kata lain akuifer merupakan suatu unit geologi yang dapat menyimpan dan meloloskan air dalam jumlah yang cukup.

Pencemaran air oleh Dix (1981) didefinisikan sebagai terjadinya perubahan kualitas air secara alami ataupun oleh kegiatan manusia yang menyebabkan air tersebut tidak dapat dimanfaatkan atau membahayakan bagi peruntukannya, seperti kesehatan manusia, industri, pertanian dan perikanan. Seperti halnya dengan air hujan maupun air permukaan lainnya bahwa airtanah juga tidak terlepas dari pencemaran (Appello dan Postma, 1993). Pencemaran dapat berasal dari berbagai macam sumber dan dapat membahayakan kesehatan manusia. Faktor manusia lebih dominan dibanding faktor alami dalam mempengaruhi kualitas airtanah. Sumber-sumber pencemar airtanah antara lain adalah berasal dari limbah domestik (*septic tank* dan jamban), limbah industri, limbah tambang, tempat sampah, limbah pertanian (Lundgren, 1986; Domenico dan Schwartz, 1990; Fetter 1994); sedangkan jenis zat pencemar dapat berupa kimiawi (organik maupun non organik), biologi, fisis, maupun radiologi. Sumber-sumber pencemar tersebut merupakan hasil atau limbah dari suatu penggunaan lahan atau kegiatan. Comans, dkk. (1987) mengemukakan bahwa terdapat korelasi antara kualitas airtanah dan penggunaan lahan di atasnya serta dapat dibedakan unsur yang bukan merupakan kontribusi dari penggunaan lahan (dalam hal ini litologi). Hal itu ditunjukkan

melalui suatu analisis kualitas airtanah dari sampel-sampel yang diambil dari berbagai tipe penggunaan lahan.

Faktor-faktor hidrogeologi berpengaruh terhadap masuknya polutan ke dalam airtanah (Todd, 1980). Curah hujan mempunyai kontribusi tinggi terhadap pencemaran, karena akan melarutkan atau melindi zat polutan. Faktor hidrogeologi lain seperti kedalaman muka airtanah, tekstur tanah, litologi zona tak jenuh maupun jenuh air, konduktivitas hidraulik akan menentukan cepat lambatnya polutan menuju airtanah. Menurut LeGrand (Todd, 1980), faktor gradien hidraulik dan jarak horizontal dari sumber pencemar juga mempengaruhi proses tersebut.

Terminologi mengenai kerentanan airtanah terhadap pencemaran (*groundwater vulnerability to contamination*) diperkenalkan di Perancis pada tahun 1960 oleh Margat (Vrba dan Zaporosec, 1994). Tingkat kerentanan airtanah tersebut didasarkan pada asumsi bahwa lingkungan fisik mempunyai tingkat perlindungan airtanah terhadap alam dan dampak aktivitas manusia khususnya pencemaran, atau dengan kata lain bahwa kerentanan airtanah merupakan fungsi dari faktor-faktor hidrogeologi. Interpretasi kondisi hidrogeologi ini bersifat kualitatif dan tidak mencakup proses pergerakan polutan dari permukaan ke dalam airtanah.

Ferreira (1997), membedakan istilah kerentanan airtanah terhadap pencemaran (*groundwater vulnerability to contamination*) dengan risiko pencemaran (*pollution risk*). Risiko pencemaran airtanah tidak hanya mendasarkan pada kerentanan airtanah yang bersifat statis tetapi juga pada sumber pencemaran ataupun polutan yang bersifat dinamis. Dengan kata lain, risiko pencemaran airtanah bergantung pada dua faktor yaitu polutan serta kemampuan infiltrasi dan mencapai zona jenuh air. Hal tersebut dapat dijelaskan bahwa suatu daerah mempunyai kerentanan tinggi tetapi tidak mempunyai risiko pencemaran airtanah karena tidak ada sumber pencemaran yang ada di daerah tersebut.

Banyak metode yang digunakan untuk analisis kerentanan airtanah terhadap pencemaran, yaitu metode HCS (*hydrological complex and setting method*); metode sistem parametrik (*parametric system method*) yang terdiri atas: metode MS (*matrix systems*), RS (*rating systems*), dan PCSM (*point count system models*); serta model hubungan analogi dan numerik (*analogical relations and numerical models*) (Vrba dan Zaporosec, 1994). DRASTIC merupakan salah satu teknik dari metode PCSM. Metode PCSM ini sering pula disebut sebagai metode pembobotan dan penilaian (*parameter weighting and rating method*). Pada metode ini setiap parameter diberi bobot dan nilai, yang selanjutnya setiap nilai dikalikan dengan bobot parameter. Penjumlahan semua parameter dari hasil perkalian tersebut merupakan nilai akhir yang menunjukkan tingkatan (klas) kerentanan airtanah terhadap pencemaran.

Menurut Burrough (1986), Sistem Informasi Geografis (SIG) sebagai suatu alat yang digunakan untuk pengumpulan, penyimpanan, pengaktifan, pentransformasian serta penyajian data spasial dari suatu fenomena nyata di permukaan Bumi untuk tujuan tertentu. Di samping hal tersebut, SIG mampu

melalui suatu analisis kualitas airtanah dari sampel-sampel yang diambil dari berbagai tipe penggunaan lahan.

Faktor-faktor hidrogeologi berpengaruh terhadap masuknya polutan ke dalam airtanah (Todd, 1980). Curah hujan mempunyai kontribusi tinggi terhadap pencemaran, karena akan melarutkan atau melindi zat polutan. Faktor hidrogeologi lain seperti kedalaman muka airtanah, tekstur tanah, litologi zona tak jenuh maupun jenuh air, konduktivitas hidraulik akan menentukan cepat lambatnya polutan menuju airtanah. Menurut LeGrand (Todd, 1980), faktor gradien hidraulik dan jarak horizontal dari sumber pencemar juga mempengaruhi proses tersebut.

Terminologi mengenai kerentanan airtanah terhadap pencemaran (*groundwater vulnerability to contamination*) diperkenalkan di Perancis pada tahun 1960 oleh Margat (Vrba dan Zaporosec, 1994). Tingkat kerentanan airtanah tersebut didasarkan pada asumsi bahwa lingkungan fisik mempunyai tingkat perlindungan airtanah terhadap alam dan dampak aktivitas manusia khususnya pencemaran, atau dengan kata lain bahwa kerentanan airtanah merupakan fungsi dari faktor-faktor hidrogeologi. Interpretasi kondisi hidrogeologi ini bersifat kualitatif dan tidak mencakup proses pergerakan polutan dari permukaan ke dalam airtanah.

Ferreira (1997), membedakan istilah kerentanan airtanah terhadap pencemaran (*groundwater vulnerability to contamination*) dengan risiko pencemaran (*pollution risk*). Risiko pencemaran airtanah tidak hanya mendasarkan pada kerentanan airtanah yang bersifat statis tetapi juga pada sumber pencemaran ataupun polutan yang bersifat dinamis. Dengan kata lain, risiko pencemaran airtanah bergantung pada dua faktor yaitu polutan serta kemampuan infiltrasi dan mencapai zona jenuh air. Hal tersebut dapat dijelaskan bahwa suatu daerah mempunyai kerentanan tinggi tetapi tidak mempunyai risiko pencemaran airtanah karena tidak ada sumber pencemaran yang ada di daerah tersebut.

Banyak metode yang digunakan untuk analisis kerentanan airtanah terhadap pencemaran, yaitu metode HCS (*hydrological complex and setting method*); metode sistem parametrik (*parametric system method*) yang terdiri atas: metode MS (*matrix systems*), RS (*rating systems*), dan PCSM (*point count system models*); serta model hubungan analogi dan numeric (*analogical relations and numerical models*) (Vrba dan Zaporosec, 1994). DRASTIC merupakan salah satu teknik dari metode PCSM. Metode PCSM ini sering pula disebut sebagai metode pembobotan dan penilaian (*parameter weighting and rating method*). Pada metode ini setiap parameter diberi bobot dan nilai, yang selanjutnya setiap nilai dikalikan dengan bobot parameter. Penjumlahan semua parameter dari hasil perkalian tersebut merupakan nilai akhir yang menunjukkan tingkatan (klas) kerentanan airtanah terhadap pencemaran.

Menurut Burrough (1986), Sistem Informasi Geografis (SIG) sebagai suatu alat yang digunakan untuk pengumpulan, penyimpanan, pengaktifan, pentransformasian serta penyajian data spasial dari suatu fenomena nyata di permukaan Bumi untuk tujuan tertentu. Di samping hal tersebut, SIG mampu

perlapisan yang ada sesuai kenampakan fisik tanah di lapangan. Untuk data tekstur tanah permukaan, sampel diambil pada kedalaman zona perakaran. Selanjutnya untuk materi zona tak jenuh diambil pada bagian bawah zona perakaran hingga sebelum airtanah; sedangkan materi akuifer diambil pada zona jenuh air. Sampel-sampel tanah tersebut selanjutnya dianalisa di laboratorium yaitu melalui analisa besar butir baik dengan metode ayak maupun metode pipet sesuai dengan ukuran materi yang ada.

4. Lereng diperoleh dari peta kontur topografi pada Peta Rupa Bumi Indonesia Lembar Sleman, Pakem, Yogyakarta, dan Timoho skala 1 : 25.000, Tahun 1991.
5. Konduktivitas hidraulik untuk akuifer bebas ditentukan berdasarkan hasil uji pompa. Metode uji pompa yang digunakan adalah *shallow dug-well recovery test* (Bouwer dan Rice, 1976 dalam Kruseman dan deRidder, 1991).

Data untuk penentuan Indeks Kerentanan, selain parameter DRASTIC tersebut, adalah data penggunaan lahan. Penggunaan lahan diperoleh langsung dari Peta Rupa Bumi Indonesia skala 1 : 25.000 Tahun 1991 dan juga dilakukan uji lapangan terhadap peta ini. Data ini dilengkapi dengan lokasi industri dan peternakan ayam melalui survei, serta data jumlah penduduk.

Pengolahan dan Analisis Data

Pengolahan dan analisis data untuk menentukan kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran dengan menggunakan metode PCSM (*Point Count System Model*) atau sering disebut metode pembobotan dan penilaian parameter. Besarnya bobot menunjukkan besarnya kontribusi parameter terhadap kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran, sedangkan nilai pada setiap kelas parameter menunjukkan hierarki aspek penyusun pada setiap parameter. Parameter yang digunakan mencakup parameter DRASTIC dan penggunaan lahan. Baik parameter DRASTIC maupun penggunaan lahan, keduanya untuk menentukan kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran. Kerentanan airtanah ini dipilah menjadi dua, yaitu: bersifat statis dan dinamis; yang pertama hanya mempertimbangkan parameter DRASTIC saja, sedangkan yang kedua mempertimbangkan parameter DRASTIC dan penggunaan lahan. Parameter DRASTIC meliputi:

- D : *Depth to the water table* (kedalaman muka airtanah)
- R : *Recharge* (curah hujan)
- A : *Aquifer media* (media akuifer)
- S : *Soil media* (tekstur tanah)
- T : *Topography* (lereng)
- I : *Impact of vadose zone* (pengaruh zona tak jenuh)
- C : *Conductivity* (konduktivitas hidraulik)

Prinsip penilaian kerentanan airtanah bebas yang bersifat statis adalah perkalian antara bobot (w) dan nilai (r) setiap parameter, yang selanjutnya semua

parameter tersebut dijumlahkan dan disebut sebagai Indeks DRASTIC. Rumus Indeks DRASTIC adalah.

$$\text{Indeks DRASTIC} = D_w D_r + R_w R_r + A_w A_r + S_w S_r + T_w T_r + I_w I_r + C_w C_r \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

D = kedalaman muka airtanah

R = curah hujan

A = media akuifer

S = tekstur tanah

T = topografi (lereng)

I = media zona tak jenuh

C = konduktivitas hidraulik

w = bobot masing-masing parameter

r = nilai masing-masing parameter

Untuk penilaian kerentanan airtanah bebas yang dinamis adalah dengan menjumlahkan Indeks DRASTIC dan hasil perkalian antara bobot (w) dan nilai (r) penggunaan lahan, yang dirumuskan sebagai Indeks Kerentanan. Rumus Indeks Kerentanan adalah:

$$\text{Indeks Kerentanan} = \text{Indeks DRASTIC} + Lu_w Lu_r \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan :

Lu_w = bobot penggunaan lahan

Lu_r = nilai penggunaan lahan

Pengkelasan kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran adalah sesuai dengan rentang nilai indeks DRASTIC maupun indeks kerentanan yang diperoleh, yaitu nilai tertinggi dikurangkan nilai terendah dan dibagi jumlah kelas. Berdasarkan indeks tersebut dibagi dalam lima kelas, yaitu: tidak rentan, kerentanan rendah, kerentanan sedang, kerentanan tinggi dan kerentanan sangat tinggi. Bobot dan nilai masing-masing parameter kerentanan disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Bobot Parameter Kerentanan Airtanah Bebas terhadap Pencemaran

No	Parameter		Bobot
1.	D	Kedalaman Muka Airtanah	5
2.	R	Curah hujan	4
3.	A	Media Akuifer	3
4.	S	Tekstur Tanah	2
5.	T	Lereng	1
6.	I	Media Zona Tak Jenuh	5
7.	C	Konduktivitas Hidrolik	3
8.	Lu	Penggunaan Lahan	4

Sumber: Aller, *et al.* (1987, dalam Rosen, 1993); Widyastuti (2003)

Tabel 2. Nilai Masing-Masing Parameter Kerentanan
Airtanah Bebas terhadap Pencemaran

No	Parameter Kerentanan	Nilai
Interval Kedalaman (m)		
1.	0 – 1.5	10
2.	1.5 – 3	9
3.	3 – 9	7
4.	9 – 15	5
5.	15 – 22	3
6.	22 – 30	2
7.	> 30	1
Curah Hujan (mm/th)		
1.	0 – 1500	2
2.	1500 – 2000	4
3.	2000 – 2500	6
4.	2500 – 3000	8
5.	> 3000	10
Media Akuifer		
1.	Shale massif	2
2.	Batuan metamorf/beku	3
3.	Batuan metamorf/beku lapuk	4
4.	Batupasir tipis, shale dan batugamping	6
5.	Batupasir massif	6
6.	Batugamping massif	6
7.	Pasir dan kerikil	8
8.	Basal	9
9.	Batugamping karst	10
Tekstur Tanah		
1.	Tipis	10
2.	Kerikil	10
3.	Pasir	9
4.	Shrinking dan atau agregat lempung	7
5.	Geluh pasiran (sandy loam)	6
6.	Geluh (loam)	5
7.	Geluh lanauan (silty loam)	4
8.	Geluh lempungan (clay loam)	3
9.	Non shrinking dan non agregat lempung	1
Lereng (%)		
1.	0 – 2	10
2.	2 – 6	9
3.	6 – 12	5
4.	12 – 18	3
5.	> 18	1

Tabel 2. Nilai Masing-Masing Parameter Kerentanan
Airtanah Bebas terhadap Pencemaran

No	Parameter Kerentanan	Nilai
Interval Kedalaman (m)		
1.	0 – 1.5	10
2.	1.5 – 3	9
3.	3 – 9	7
4.	9 – 15	5
5.	15 – 22	3
6.	22 – 30	2
7.	> 30	1
Curah Hujan (mm/th)		
1.	0 – 1500	2
2.	1500 – 2000	4
3.	2000 – 2500	6
4.	2500 – 3000	8
5.	> 3000	10
Media Akuifer		
1.	Shale massif	2
2.	Batuan metamorf/beku	3
3.	Batuan metamorf/beku lapuk	4
4.	Batupasir tipis, shale dan batugamping	6
5.	Batupasir massif	6
6.	Batugamping massif	6
7.	Pasir dan kerikil	8
8.	Basal	9
9.	Batugamping karst	10
Tekstur Tanah		
1.	Tipis	10
2.	Kerikil	10
3.	Pasir	9
4.	Shrinking dan atau agregat lempung	7
5.	Geluh pasir (sandy loam)	6
6.	Geluh (loam)	5
7.	Geluh lanauan (silty loam)	4
8.	Geluh lempungan (clay loam)	3
9.	Non shrinking dan non agregat lempung	1
Lereng (%)		
1.	0 – 2	10
2.	2 – 6	9
3.	6 – 12	5
4.	12 – 18	3
5.	> 18	1

Tabel 2. lanjutan

No	Parameter Kerentanan	Nilai
Material Zona Tak Jenuh		
1.	Lanau/lempung	1
2.	Shale	3
3.	Batugamping	6
4.	Batupasir	6
5.	Bedded limestone, batupasir, shale	6
6.	Shale dan kerikil dengan lanau dan lempung cukup	6
7.	Pasir dan kerikil	4
8.	Batuan metamorf/beku	8
9.	Basal	9
10.	Batugamping karst	10
Konduktivitas Hidraulik (m/hari)		
1.	0 - 0.86	1
2.	0.86 - 2.59	2
3.	2.59 - 6.05	4
4.	6.05 - 8.64	6
5.	8.64 - 17.18	8
6.	> 17.18	10

Sumber: Aller *et al.* (1987 dalam Rosen, 1993)

Penggunaan lahan adalah salah satu parameter kerentanan yang merupakan pengembangan dari metode DRASTIC. Pemberian nilai pada masing-masing tipe penggunaan lahan didasarkan pada estimasi, sesuai dengan kontribusinya terhadap pencemaran airtanah bebas. Untuk nilai yang tinggi menunjukkan besarnya pengaruh terhadap pencemaran airtanah bebas, demikian sebaliknya. Dasar pemberian nilai adalah dengan mempertimbangkan besar kecilnya pengaruh setiap penggunaan lahan terhadap pencemaran airtanah, tingkat infiltrasi, limpasan (*runoff*), dan ada tidaknya lapisan kedap (pada olah atau *plough pan*) penghambat masuknya air ke dalam muka airtanah. Tipe penggunaan lahan permukiman dirinci dengan menambahkan jumlah penduduk, lokasi industri dan peternakan. Klasifikasi jumlah penduduk didasarkan atas jumlah penduduk yang ada di daerah penelitian dan dibagi ke dalam tiga kelas yaitu rendah, sedang dan tinggi; sedangkan untuk lokasi industri dan peternakan tidak diklasifikasikan.

Teknik pengolahan dan analisis data tersebut dilakukan menggunakan SIG dengan *software* ArcView. Masing-masing parameter DRASTIC dan penggunaan lahan dipetakan. Selanjutnya untuk menentukan kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran dilakukan dengan teknik tumpang susun (*overlay*). Peta kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran yang bersifat statis merupakan hasil tumpang susun dari semua parameter DRASTIC, yaitu: kedalaman muka airtanah, curah hujan, media akuifer, tekstur tanah, topografi, pengaruh zona tak jenuh, dan konduktivitas hidrolik. Peta kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran yang

bersifat dinamis merupakan hasil tumpang susun antara peta kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran dan peta penggunaan lahan. Analisis hasil perkiraan resiko airtanah bebas terhadap pencemaran dilakukan secara spasial dan deskriptif, yaitu dimaksudkan untuk menjelaskan pola sebaran resiko dan keterkaitan antara parameter resiko airtanah bebas terhadap pencemaran.

Tabel 3. Nilai Penggunaan Lahan

No	Tipe Penggunaan Lahan	Nilai
1.	Lahan kosong/tak terolah	1
2.	Hutan	1
3.	Kebun/Perkebunan	3
4.	Tegalan	3
5.	Persawahan	2
6.	Permukiman:	
	- Jumlah penduduk rendah	5
	- Ada lokasi industri dan peternakan	6
	- Jumlah penduduk sedang	7
	- Ada lokasi industri dan peternakan	8
	- Jumlah penduduk tinggi	9
	- Ada lokasi industri dan peternakan	10

Sumber : Widyastuti (2003)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter Kerentanan Airtanah Bebas terhadap Pencemaran

Berdasarkan hasil pengukuran lapangan (kedalaman muka airtanah, media akuifer, tekstur tanah, media zona tak jenuh, dan konduktivitas hidraulik) maupun analisis data sekunder (curah hujan dan lereng), distribusi masing-masing parameter DRASTIC di daerah penelitian tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Distribusi Parameter DRASTIC di Daerah Penelitian

No	Interval Kedalaman (m)	Persebaran Kedalaman MA
1.	0 – 1.5	Sebagian kecil wilayah (Desa Trimulyo, Triharjo, Wedomartani, Sardonoarjo) sifatnya lokal
2.	1.5 – 3	Desa Trimulyo, Caturharjo (Sleman); Donoharjo, Sardonoarjo (Ngaglik); Widodomartani, Bimomartani, Sindumartani (Ngempalk)
3.	3 – 9	Desa Triharjo, Tridadi, Pendowoharjo (Sleman); Sariharjo, Sinduharjo, Minomartani, Sukoharjo, sebagian Sardonoarjo (Ngaglik); Umbulmartani, Wedomartani, sebagian Widodomartani (Ngemplak)
4.	9 – 15	Sebagian kecil wilayah Desa Sukoharjo (Ngaglik)
5.	15 – > 30	Tidak ada

bersifat dinamis merupakan hasil tumpang susun antara peta kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran dan peta penggunaan lahan. Analisis hasil perkiraan resiko airtanah bebas terhadap pencemaran dilakukan secara spasial dan deskriptif, yaitu dimaksudkan untuk menjelaskan pola sebaran resiko dan keterkaitan antara parameter resiko airtanah bebas terhadap pencemaran.

Tabel 3. Nilai Penggunaan Lahan

No	Tipe Penggunaan Lahan	Nilai
1.	Lahan kosong/tak terolah	1
2.	Hutan	1
3.	Kebun/Perkebunan	3
4.	Tegalan	3
5.	Persawahan	2
6.	Permukiman:	
	- Jumlah penduduk rendah	5
	- Ada lokasi industri dan peternakan	6
	- Jumlah penduduk sedang	7
	- Ada lokasi industri dan peternakan	8
	- Jumlah penduduk tinggi	9
	- Ada lokasi industri dan peternakan	10

Sumber : Widyastuti (2003)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter Kerentanan Airtanah Bebas terhadap Pencemaran

Berdasarkan hasil pengukuran lapangan (kedalaman muka airtanah, media akuifer, tekstur tanah, media zona tak jenuh, dan konduktivitas hidraulik) maupun analisis data sekunder (curah hujan dan lereng), distribusi masing-masing parameter DRASTIC di daerah penelitian tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Distribusi Parameter DRASTIC di Daerah Penelitian

No	Interval Kedalaman (m)	Persebaran Kedalaman MA
1.	0 – 1.5	Sebagian kecil wilayah (Desa Trimulyo, Triharjo, Wedomartani, Sardonoarjo) sifatnya lokal
2.	1.5 – 3	Desa Trimulyo, Caturharjo (Sleman); Donoharjo, Sardonoarjo (Ngaglik); Widodomartani, Bimomartani, Sindumartani (Ngempalk)
3.	3 – 9	Desa Triharjo, Tridadi, Pendowoharjo (Sleman); Sariharjo, Sinduharjo, Minomartani, Sukoharjo, sebagian Sardonoarjo (Ngaglik); Umbulmartani, Wedomartani, sebagian Widodomartani (Ngemplak)
4.	9 – 15	Sebagian kecil wilayah Desa Sukoharjo (Ngaglik)
5.	15 – > 30	Tidak ada

Tabel 4. lanjutan

No	Curah Hujan (mm/th)	Persebaran Curah Hujan
1.	0 – 1500	Tidak ada
2.	1500 – 2000	Sebagian kecil Desa Wedomartani (Ngemplak)
3.	2000 – 2500	Wilayah Kecamatan Ngemplak dan sebagian Kecamatan Ngaglik
4.	2500 – 3000	Wilayah Kecamatan Sleman dan sebagian Kecamatan Ngaglik
5.	> 3000	Tidak ada
No	Media Akuifer	Persebaran Media Akuifer
1.	Geluh pasiran	Sebagian kecil wilayah Desa Sardonoarjo (Ngaglik)
2.	Pasir geluhan	Sebagian besar Kecamatan Sleman dan Ngaglik; sebagian Desa Umbulmartani, Widodomartani, Sindumartani, Bimomartani dan Wedomartani (Ngemplak)
3.	Pasir	Sebagian kecil Ds. Caturharjo, Triharjo, Pendowoharjo dan Tridadi (Sleman); Sariharjo, Donoharjo, Sardonoarjo (Ngaglik); sebagian kecil Wedomartani, Umbulmartani, Widodomartani, Sindumartani dan Bimomartani (Ngemplak)
No	Tekstur Tanah	Persebaran Tekstur Tanah
1.	Pasir	Sebagian Desa Sukoharjo (Ngaglik), Widodomartani dan Wedomartani (Ngemplak)
2.	Pasir geluhan	Sebagian besar Kecamatan Sleman, Desa Sriharjo dan Sinduharjo (Ngaglik)
3.	Geluh pasiran	Tersebar di tiga wilayah Kecamatan : Ngemplak, Ngaglik, Sleman
4.	Geluh	Sebagian besar wilayah Kecamatan Ngaglik, Desa Wedomartani, Widodomartani, Sindumartani dan sebagian kecil Umbulmartani (Ngemplak), Sebagai kecil Caturharjo dan Tridadi (Sleman)
No	Lereng (%)	Persebaran Lereng
1.	0 – 2	Sebagian besar wilayah Kec. Ngaglik; Pendowoharjo (Sleman); Wedomartani, Widodomartani (Ngemplak)
2.	2 – 6	Desa Caturharjo, Triharjo, Trimulyo, sebagian Donoharjo, Tridadi (Sleman); sebagian kecil wilayah Donoharjo, Sardonoarjo, Sariharjo (Ngaglik); Umbulmartani, Bimomartani, Sindumartani (Ngemplak)
3.	6 – > 18	Tidak ada
No	Media Zona Tak Jenuh	Persebaran Media Zona Tak Jenuh
1.	Pasir	Sebagian kecil Desa Tridadi (Sleman), Sariharjo (Ngaglik) dan Umbulmartani, Widodomartani (Ngemplak)
2.	Pasir geluhan	Sebagian besar Kecamatan Sleman, sebagian kecil Kecamatan Ngemplak, sebagian Kecamatan Ngaglik
3.	Geluh pasiran	Sebagian kecil Desa Caturharjo, Tridadi dan Pendowoharjo (Sleman), sebagian Kecamatan Ngaglik dan Ngemplak

Tabel 4. lanjutan ...

No	Konduktivitas Hidrolik (m/hari)	Persebaran Konduktivitas Hidrolik
1.	0 – 0,86	Tidak ada
2.	0,86 – 2,59	Desa Caturharjo, sebagian kecil Triharjo, Pendowoharjo (Sleman) dan Bimomartani, Sindumartani (Ngemplak)
3.	2,59 – 6,05	Desa Caturharjo, Triharjo, sebagian kecil Pendowoharjo (Sleman); Sukoharjo dan Sariharjo (Ngaglik), Widodomartani, Bimomartani dan Umbulmartani (Ngemplak)
4.	6,05 – 8,64	Sebagian wilayah Desa Trimulyo, Triharjo, Tridadi, Pendowoharjo (Sleman); Sariharjo, Sukoharjo (Ngaglik); Wedomartani, Widodomartani dan Bimomartani (Ngemplak)
5.	8,64 – 17,18	Sebagian Kecamatan Ngaglik, sebagian kecil Kecamatan Sleman dan Ngemplak
6.	> 17,18	Sebagian Kecamatan Ngaglik; Desa Pendowoharjo (Sleman); Umbulmartani dan Wedomartani (Ngemplak)

Sumber : Widyastuti (2004)

Apabila dicermati secara umum (Tabel 4), parameter DRASTIC di daerah penelitian mempunyai pengaruh tinggi terhadap potensi pencemaran. Pengaruh masing-masing parameter dapat dijelaskan sebagai berikut. Kedalaman airtanah di daerah penelitian relatif dangkal, yaitu kedalaman terukur antara 1,5 - 9 meter. Curah hujan di daerah penelitian relatif tinggi yaitu berkisar antara 2.000 - 3.000 mm/tahun. Selanjutnya mengenai kondisi geologi daerah penelitian termasuk ke dalam Endapan Vulkanik Merapi, mempunyai sifat porus. Berdasarkan data *log bor* dapat diketahui bahwa hasil pemboran dengan rata-rata kedalaman 100 meter, tampak dominasi material pasir dengan ukuran halus hingga kasar. Kenyataan tersebut memberikan pengaruh terhadap kondisi media akuifer, media zona tak jenuh dan tektur tanah permukaan. Hasil pengukuran lapangan menunjukkan bahwa media akuifer di daerah penelitian didominasi oleh materi pasir geluhan dan pasir. Media zona tak jenuh di daerah penelitian sebagian besar merupakan pasir geluhan dan geluh pasiran; sedangkan untuk tekstur tanah permukaan relatif bervariasi yaitu dari geluh hingga pasir.

Dengan melihat kondisi tersebut, memberikan pengaruh yang besar terhadap potensi pencemaran karena sifat materi yang porus. Secara geomorfologis, daerah penelitian termasuk lereng tengah Gunungapi Merapi. Hasil analisis Peta Rupa Bumi, kelerengan daerah penelitian berkisar antara 0 – 6%. Sebagian besar merupakan topografi datar hingga hampir datar (0 – 2%), selebihnya pada bagian atas daerah penelitian termasuk lereng landai (2 – 6%). Lereng yang relatif datar tersebut mempunyai pengaruh tinggi terhadap pencemaran, karena memberikan peluang bagi masuknya polutan ke dalam airtanah. Konduktivitas hidrolik (K) akuifer daerah penelitian termasuk tinggi, sebagian besar mempunyai nilai K lebih dari 6 m/hari. Tingginya nilai K ini membawa konsekuensi terhadap cepatnya pergerakan polutan, sehingga memberikan pengaruh yang besar terhadap kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran.

Penggunaan lahan merupakan sumber pencemar yang potensial dan bersifat dinamis, karena merupakan representasi dari aktivitas manusia. Oleh karena itu penggunaan lahan diberikan bobot yang tinggi, yaitu 4. Jenis penggunaan lahan di daerah penelitian cukup bervariasi, yaitu hutan, kebun/ perkebunan, permukiman rumput/tanah kosong serta tegalan/ladang. Masing-masing jenis penggunaan lahan memberikan pengaruh pada kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran sesuai dengan tingkatan pengaruh. Hal tersebut tercermin dari masing-masing tipe penggunaan lahan. Lahan kosong maupun hutan mempunyai nilai rendah karena pengaruhnya terhadap pencemaran relatif kecil. Tegalan maupun kebun/perkebunan mempunyai nilai yang lebih tinggi dari persawahan, meskipun jika dilihat intensitas penggunaan pupuk lebih tinggi pada persawahan. Pertimbangannya adalah asumsi bahwa pada kondisi umum yang dijumpai di persawahan terdapat padas olah (*plough pan*) sebagai akibat pengolahan lahan dengan pembajakan atau penggunaan peralatan pertanian lainnya. Hal lain adalah limpasan dari persawahan lebih tinggi dibandingkan tegalan, demikian halnya dengan infiltrasi.

Dalam melakukan penilaian penggunaan lahan ini, dilakukan pendetailan permukiman. Pemukiman dipilah dengan memasukkan unsur penduduk, lokasi industri dan ternak. Tingginya nilai permukiman, dengan pertimbangan bahwa penduduk akan memberikan sejumlah limbah rumah tangga (domestik). Semakin besar jumlah penduduk maka akan semakin besar pula jumlah limbah yang dihasilkan. Di samping itu, kegiatan industri rumah tangga seperti industri tahu/tempe juga melekat dengan penduduk; karena sulit untuk dilakukan plotting lokasi. Industri rumah tangga relatif menyebar di setiap kecamatan daerah penelitian.

Jumlah penduduk dikelaskan menjadi tiga, yaitu: jumlah penduduk rendah, sedang, dan tinggi. Klasifikasi jumlah penduduk tersebut untuk menggambarkan distribusi spasialnya, yang selanjutnya digunakan untuk kepentingan analisis melalui *overlay* dengan peta penggunaan lahan. Jumlah penduduk di daerah penelitian adalah 566.999 jiwa, jumlah tertinggi terdapat di Desa Wedomartani (18.165 jiwa) dan terendah di Desa Bimomartani (6.570 jiwa). Klasifikasi jumlah penduduk masing-masing desa dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Klasifikasi Jumlah Penduduk di Daerah Penelitian

No.	Jumlah Penduduk (Jiwa)	Kelas	Desa/Kecamatan
1.	6.570 – 10.435	Rendah	Desa Triharjo, Pendowoharjo (Sleman); Donoharjo, Sukoharjo (Ngaglik); Umbulmartani, Widodomartani, Bimomartani, Sindumartani (Ngemplak)
2.	10.435 – 14.300	Sedang	Desa Caturharjo, Tridadi (Sleman); Sariharjo, Sardonomartani, Sinduharjo, Minomartani (Ngaglik)
3.	14.300 – 18.165	Tinggi	Desa Trimulyo (Sleman) dan Wedomartani (Ngemplak)

Sumber: Widyastuti (2003)

Kegiatan industri yang dimasukkan dalam penilaian adalah kelas industri besar. Berdasarkan data Sub Dinas Perindustrian (2002) dan survei lapangan, kegiatan industri besar yang mempunyai potensi terhadap pencemaran airtanah bebas di daerah penelitian, terdapat di Kecamatan Sleman. Jenis industri tersebut meliputi: industri tekstil, pemintalan, lampu pijar dan TL, kemasan dan produk plastik, serta sarung tangan kulit. Untuk lokasi peternakan ayam di daerah penelitian, hampir terdapat di setiap kecamatan. Namun demikian, sebagian besar lokasi peternakan terdapat di Kecamatan Ngemplak. Berdasarkan hasil survei lapangan, lokasi peternakan secara umum tidak terletak di tengah permukiman tetapi kebanyakan di persawahan/tegalan.

Kerentanan Statis Airtanah Bebas terhadap Pencemaran

Berdasarkan hasil analisis melalui teknik tumpang susun (*overlay*) semua parameter DRASTIC diperoleh rentang nilai indeks, yaitu antara 73 - 172. Klasifikasi kerentanan airtanah yang bersifat statis dari nilai indeks tersebut untuk daerah penelitian dapat dilihat pada Tabel 6, sedangkan distribusi spasialnya dapat dilihat pada Gambar 1. Hasil analisis menunjukkan bahwa masing-masing kelas kerentanan tersebar di setiap kecamatan di daerah penelitian. Paling luas adalah kelas kerentanan tinggi, yaitu: 7.049,86 ha (66,79%), kedua adalah kelas kerentanan sangat tinggi yaitu 2.974,63 ha (28,18%), ketiga adalah kelas kerentanan sedang yaitu 529,90 ha (5,02%). Untuk kelas kerentanan rendah dan tidak rentan relatif sempit, masing-masing 0,148 ha (0,0014%) dan 0,003 ha (0,0003%) dari keseluruhan luas daerah penelitian.

Tabel 6. Klasifikasi Kerentanan Statis Airtanah Bebas di Daerah Penelitian

No	Indeks DRASTIC	Klasifikasi Kerentanan
1.	73 - 92	Tidak rentan
2.	93 - 112	Kerentanan rendah
3.	113 - 132	Kerentanan sedang
4.	133 - 152	Kerentanan tinggi
5.	153 - 172	Kerentanan sangat tinggi

Sumber : Widyastuti (2004)

Kerentanan Dinamis Airtanah Bebas terhadap Pencemaran

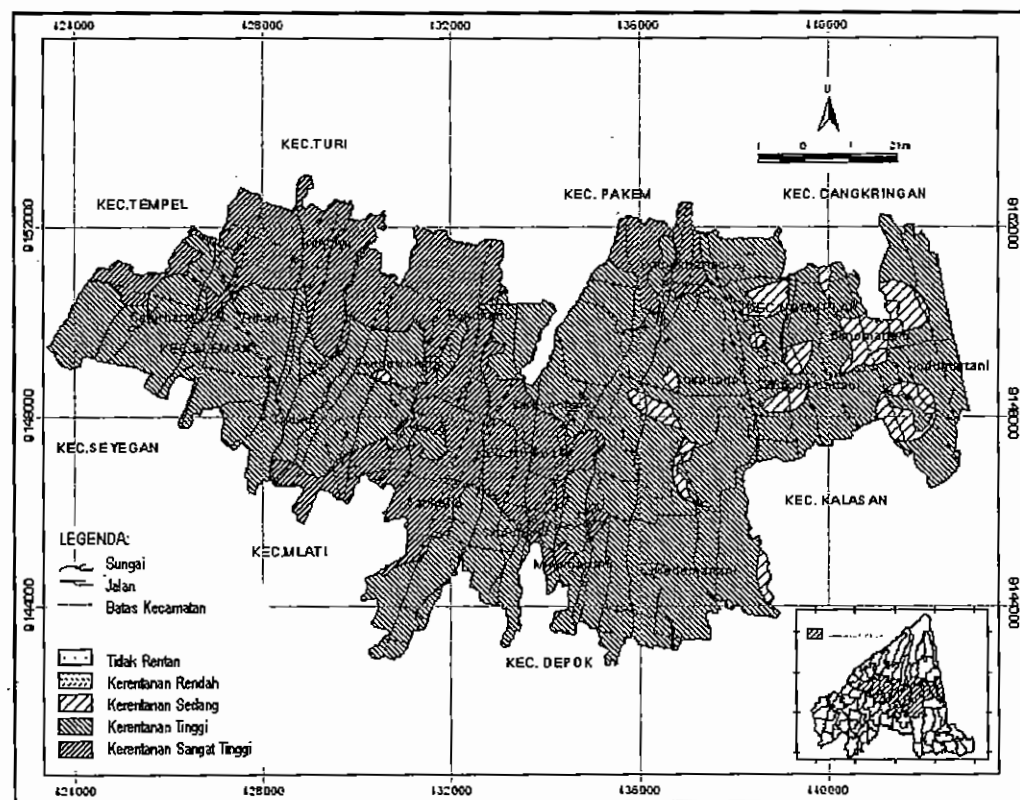
Tumpang susun parameter DRASTIC dengan peta penggunaan lahan menghasilkan nilai indeks kerentanan dengan julat antara 81 hingga 200. Klasifikasi kerentanan dinamis berdasarkan nilai indeks daerah penelitian dapat dilihat pada Tabel 7. Selanjutnya, hasil klasifikasi kerentanan dinamis tersebut dianalisis lebih lanjut melalui tabulasi silang dengan hasil klasifikasi kerentanan statis. Hal tersebut dilakukan untuk memperoleh hasil yang lebih teliti dibanding dengan hanya mengacu pada hasil klasifikasi kerentanan dinamis saja. Hasil analisis tersebut secara spasial dapat dilihat pada Gambar 2, dan luasan masing-masing kelas kerentanan sebagai berikut. Kelas kerentanan tinggi 6.065,51 ha

(57,42 %), kelas kerentanan sangat tinggi 3.979,87 ha (37,67 %), kelas kerentanan sedang 518,87 ha (4,91 %). Untuk kelas kerentanan rendah dan tidak rentan relatif sempit, masing-masing 0,145 ha (0,0014%) dan 0,004 ha (0,000004%) dari keseluruhan luas daerah penelitian.

Tabel 7. Klasifikasi Kerentanan Dinamis di Daerah Penelitian

No	Indeks Kerentanan	Klasifikasi Kerentanan
1.	81 – 104	Tidak rentan
2.	105 – 128	Kerentanan rendah
3.	129 – 152	Kerentanan sedang
4.	153 – 176	Kerentanan tinggi
5.	177 – 200	Kerentanan sangat tinggi

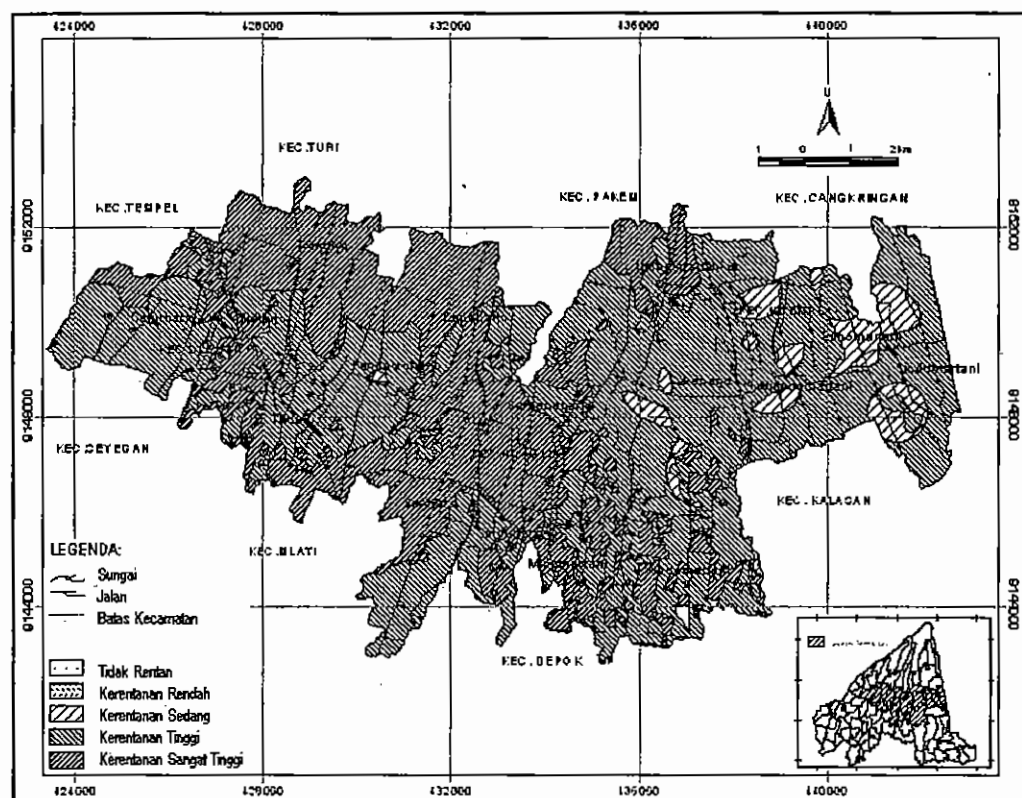
Sumber : Widyastuti, 2003.



Gambar 1. Peta Kerentanan Statis Airtanah Bebas terhadap Pencemaran

Berdasarkan pembahasan keseluruhan parameter kerentanan, pada dasarnya tingginya tingkat kerentanan di daerah penelitian dipengaruhi oleh keseluruhan faktor hidrogeologi setempat. Utamanya adalah kedalaman muka airtanah dan materi penyusun yang relatif porus dan penggunaan lahan. Hal itu dapat dilihat dari masing-masing parameter kerentanan mempunyai nilai yang tinggi untuk

daerah penelitian. Hasil yang diperoleh dengan menambahkan parameter penggunaan lahan sebagai sumber pencemar adalah kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran di daerah penelitian lebih rinci. Perkembangan penggunaan lahan selanjutnya akan berpengaruh lain terhadap pencemaran airtanah bebas. Artinya bahwa secara hidrogeologi, daerah penelitian sudah mempunyai sensitivitas yang tinggi atau rentan terhadap pencemaran. Dengan adanya variasi penggunaan lahan tersebut, yang airtanah bebasnya sudah rentan akan dapat menjadi lebih rentan apabila penggunaan di atasnya mendukung, misalnya permukiman dengan jumlah penduduk tinggi dan terdapat kegiatan industri. Begitu pula sebaliknya, daerah yang rentan tetapi penggunaan lahannya tidak memberikan pengaruh besar terhadap pencemaran airtanah, maka daerah tersebut menjadi kurang rentan. Hal tersebut dapat ditunjukkan dari persentase luasan setiap kelas kerentanan statis dan dinamis serta distribusinya spasialnya.



Gambar 2. Peta Kerentanan Dinamis Airtanah Bebas terhadap Pencemaran

Dalam analisis kerentanan statis yang hanya mempertimbangkan parameter DRASTIC, persentase luas kelas kerentanan sangat tinggi adalah 28,18 %, kerentanan tinggi 66,79 %, kerentanan sedang 5,02 %. Untuk kerentanan dinamis, dengan menambahkan parameter penggunaan lahan, persentase luas kelas

kerentanan sangat tinggi berubah menjadi 37,67 %, kerentanan tinggi 57,42 % dan kerentanan sedang 4,91 %. Berdasarkan Gambar 1 dan 2 juga dapat dilihat bahwa wilayah yang semula kerentanan tinggi menjadi sangat tinggi. Namun demikian, juga ada yang tidak berubah. Hal tersebut mengingat sumber pencemaran dari parameter penggunaan lahan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Kerentanan statis airtanah bebas mencerminkan sensitivitas kondisi fisik daerah penelitian terhadap pencemaran bagi airtanah bebas, sedangkan kerentanan dinamis airtanah bebas mencerminkan bahwa perubahan tingkatan sensitivitas terhadap pencemaran karena pengaruh penggunaan lahan di atasnya.
2. Nilai Indeks DRASTIC (kerentanan statis) dan Nilai Indeks Kerentanan (kerentanan dinamis) mempunyai rentang nilai yang berbeda, yaitu: 73 – 172 (kerentanan statis) dan 81–200 (kerentanan dinamis). Perbedaan tersebut karena penambahan parameter penggunaan lahan. Untuk memperoleh hasil yang lebih rinci kerentanan dinamis airtanah bebas terhadap pencemaran maka hasil klasifikasi kerentanan dinamis dianalisis lebih lanjut melalui analisis tabel silang terhadap hasil klasifikasi kerentanan statis.
3. Airtanah di daerah penelitian mempunyai kerentanan tinggi terhadap pencemaran. Hal itu ditunjukkan dengan luasan daerah kerentanan statis maupun dinamis, lebih dari 50% luasan termasuk kelas kerentanan tinggi dan sangat tinggi. Untuk kelas kerentanan statis: kerentanan tinggi 7.049,86 ha (66,79%) dan kerentanan sangat tinggi 2.974,63 ha (28,18%); sedangkan untuk kerentanan dinamis: kerentanan tinggi 6.065,51 ha (57,42%) dan kerentanan sangat tinggi 3.979,87 ha (37,67%).
4. Faktor yang mempengaruhi tingginya tingkat kerentanan airtanah di daerah penelitian utamanya adalah kedalaman muka airtanah, materi yang relatif porus serta penggunaan lahan.
5. Pengembangan metode DRASTIC untuk prediksi kerentanan airtanah bebas terhadap pencemaran memberikan hasil rinci karena tidak hanya melihat kondisi hidrogeologi daerah penelitian tetapi juga mempertimbangkan sumber pencemarnya yang dalam hal ini diwakili oleh penggunaan lahan. Daerah yang mempunyai kerentanan tinggi dapat berubah menjadi kerentanan sangat tinggi karena penggunaan lahan di atasnya mempunyai potensi yang tinggi mencemari lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Data dalam penelitian ini merupakan bagian data dari penelitian penulis dalam rangka penyusunan Tesis S2 pada Program Studi Rekayasa Pertambangan, Program Pasca Sarjana, Institut Teknologi Bandung. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Taufik Hery Purwanto, S.Si, M.Si. atas dukungannya dalam penulisan makalah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Appelo, C.A.J. dan Postma, D., 1993. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. A.A. Balkema, Rotterdam.
- Borrough, P.A., 1986. *Principle of Geographical Information System for Land Resources Assesment*. Clarendon Press, Oxford.
- Comans, R.N.J., van der Weijden, C.H., dan Vried, S.P., 1987. Geochemical Studies in Drainage Basin of the Rio Vouga, Portugal. IV. Impact of Landuse on the Hydrogeochemistry of Natural Waters in the Vouzela Region, *Journal Environmental Geology Water Science*, 9(2), hal. 119-129.
- Dix, H.M., 1981. *Environmental Pollution*. John Wiley and Sons, New York.
- Djaeni, A., 1982. *Peta Hidrogeologi Lembar Yogyakarta Skala 1 : 250.000*. Direktorat Geologi Tata Lingkungan, Bandung.
- Domenico, P.A. dan Schwartz, F.W., 1990. *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley and Sons, New York.
- Fetter, C.W., 1994. *Applied Hydrogeology*, 3rd Edition. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs.
- Ferreira, J.P.L. dan Oliveira, M.M., 1997. DRASTIC Groundwater Vulnerability Mapping of Portugal, *Proceeding of the 27th Congress of The International Association for Hydraulic Research*, San Fransisco.
- Ferreira, J.P.L., 1997. GIS and Mathematical Modelling for the Assesment of Vulnaribility and Geographical Zoning for Groundwater Management and Protection, *Paper of NATO Advanced Workshop*. Vilnius, Lithuania.

- Freeze, R.A., dan Cherry, J.A., 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.
- Halliday, S. L. dan Wolfe, M.L., 1991. Assessing Groundwater Pollution Potential from Nitrogen Fertilizer Using A Geographic Information System, *Water Resources Bulletin*, 27(2), hal. 237-245.
- Hem, J.D., 1970. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristic of Natural Water*. United State Government Printing Office, Washington.
- Kashef, A.I., 1986. *Groundwater Engineering*. McGraw-Hill Book Company, New York.
- Kruseman, G.P. dan de Ridder, N.A., 1991. Analysis and Evaluation of Pumping Test Data, *ILRI* 47, Wageningen.
- Lundgren, L., 1986. *Environmental Geology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- MacDonald dan Partners, 1984. Greater Yogyakarta – Groundwater Resources Study, *Volume 3: Main Report*, Directorate General of Water Resources Development Project (P2AT), Yogyakarta.
- Merchant, J.W., 1994. GIS – Based Groundwater Pollution Hazard Assessment: A Critical Review of The DRASTIC Model, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60 (9), hal. 1117-1127.
- Raharjo, W., Sukandarrumidi, dan Rosidi, H.M.D., 1995. *Peta Geologi Lembar Yogyakarta Skala 1 : 100.000*. Direktorat Geologi, Departemen Pertambangan dan Energi, Bandung.
- Rosen, L., 1993. A Study of the DRASTIC Methodology with Emphasis on Swedish Condition, *Groundwater*, 32(2), hal. 278-285.
- Sub Dinas Perindustrian Sleman, 2002. *Laporan Pendataan Industri Menengah/Besar Kelompok Cabang Industri Aneka Kabupaten Sleman Tahun 2002*. Sub Dinas Perindustrian, Dinas Perekonomian Kabupaten Sleman.
- Todd, D.K., 1980. *Groundwater Hydrology*. John Wiley and Sons Inc., New York.

- Vrba J., Zaporosec A., 1994. *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, Vol 16*. International Association of Hydrogeologists, Verlag Heinz Heise, Hannover.
- Widyastuti, M., 2003. Prediksi Kerentanan Airtanah Bebas terhadap Pencemaran, Studi Kasus : Kecamatan Sleman, Ngaglik, dan Ngemplak Kabupaten Sleman Propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, *Tesis*, Program Pasca Sarjana, ITB.
- , 2004. Vulnerability Assesment of Groundwater to Contamination Using DRASTIC Method: Study in Sleman, dan Ngemplak Districs of Sleman Regency, Yogyakarta Special Province. *Indonesian Journal of Geography*, 36(2), hal. 73-121.